Magnitudes: un concepto desarrollado por primera vez en el año 120 AJ

Cuando miramos al cielo en una noche clara vemos estrellas. Vistas desde la Tierra, unas parecen brillantes y otras muy débiles. Algunas de estas estrellas débiles son intrínsecamente muy brillantes, pero están muy lejos. Algunas de las estrellas más brillantes del cielo son estrellas muy débiles que simplemente se encuentran muy próximas a nosotros. Cuando observamos, estamos forzamos a hacerlo desde la Tierra o en sus proximidades, y podemos sólo medir la intensidad de la luz que nos llega.
Desafortunadamente esto no nos dice de manera directa nada acerca de las *propiedades internas* de una estrella. Si queremos saber más acerca de la estrella, su tamaño o su brillo interno/ físico, por ejemplo, necesitamos conocer su *distancia* a la Tierra.

Históricamente, las estrellas visibles a simple vista fueron ordenadas en seis clases diferentes de brillo, llamadas magnitudes. Este sistema fue originariamente concebido por el astrónomo griego Hiparco en torno al año 120 AJ y está aún en uso hoy en día en una forma ligeramente revisada. Hiparco decidió que las estrellas más brillantes tendrían magnitud 1, y las más débiles magnitud 6.

¡La Astronomía ha cambiado mucho desde la época de Hiparco! En lugar de utilizar únicamente los ojos, la luz se recoge hoy en día en grandes espejos en telescopios en tierra, tales como el VLT en el Desierto de Atacama en Chile o en telescopios por encima de la atmósfera de la Tierra, como el Telescopio Espacial Hubble. La luz recogida se analiza a continuación por instrumentos capaces de detectar objetos miles de millones de veces más débiles que los que puede ver el ojo humano.

Sin embargo, incluso los astrónomos de hoy en día usan aún una forma ligeramente revisada del sistema de magnitudes de Hiparco llamado de *magnitudes aparentes*. La definición moderna de magnitud fue elegida de manera que las medidas de las magnitudes ya en uso no tuvieran que ser cambiadas.
Los astrónomos usan dos tipos diferentes de magnitudes: *magnitudes aparentes y magnitudes absolutas.*

Magnitud aparente

La magnitud aparente, m, de una estrella mide el brillo de una estralla observado desde la Tierra o cerca de ella.
En lugar de definir la magnitud aparente a partir del número de fotones de luz que observamos, se define respecto a la magnitud e intensidad de una estrella de referencia. Esto significa que un astrónomo puede medir las magnitudes de las estrellas comparando las medidas con ciertas estrellas estándar que ya han sido medi-

Figura 1: Hiparco de Nicaea (aproximadamente 190-120 AJ) trabajando
Hiparco, astrónomo Griego, inventó la primera escala para clasificar el brillo de las estrellas.

das de forma absoluta (en contraposición a las medidas relativas).
La magnitud aparente, m, viene dada por:

$m = m_{ref} - 2.5 \log_{10} (I/I_{ref})$

donde m_{ref} es la magnitud aparente de la estrella de referencia, I es la intensidad medida procedente de la estrella y I_{ref} es la intensidad de la luz procedente de la estrella de referencia. El factor de escala 2.5 nos equipara la definición moderna con las magnitudes aparentes más antiguas y más subjetivas.

Es interesante darse cuenta de que la escala que Hiparco seleccionó sobre una base intuitiva, utilizando sólo el ojo humano, es ya logarítmica como resultado de la forma en la que nuestros ojos responden a la luz.

Para comparar, la magnitud aparente de la Luna llena es aproximadamente –12.7, la magnitud de Venus puede ser tan alta como — 4 y el Sol tiene una magnitud de aproximadamente –26.5.

Magnitud Absoluta

Ahora tenemos una definición apropiada para la magnitud aparente. Es una herramienta útil para los astrónomos, pero no nos dice nada acerca de las propiedades intrínsecas de una estrella. Necesitamos establecer una propiedad común que podamos usar para comparar diferentes estrellas y para realizar análisis estadísticos. Esta propiedad es la magnitud absoluta.

La magnitud absoluta, M, se define como la magnitud relativa que tendría una estrella si fuera colocada a 10 parsecs del Sol (para más información sobre parsecs ver la sección Herramientas Matemáticas) del Sol.

Ya que hay muy pocas estrellas que estén exactamente a 10 parsecs, podemos usar una ecuación que nos permitirá calcular la magnitud absoluta para estrellas a diferentes distancias: la ecuación de distancia. La ecuación, naturalmente, también funciona en sentido contrario — puede calcularse la distancia dada la magnitud absoluta.

Diferentes colores, diferentes magnitudes

A finales del Siglo XIX, cuando los astrónomos usaban fotografías para registrar el cielo y medir las magnitudes aparentes de las estrellas, surgió un nuevo problema. Algunas estrellas que aparentemente tenían el mismo brillo cuando se observaban a simple vista, parecían tener un brillo diferente sobre la película fotográfica, y viceversa. Comparadas con el ojo, las emulsiones fotográficas usadas eran más sensibles a la luz azul y menos a la luz roja.

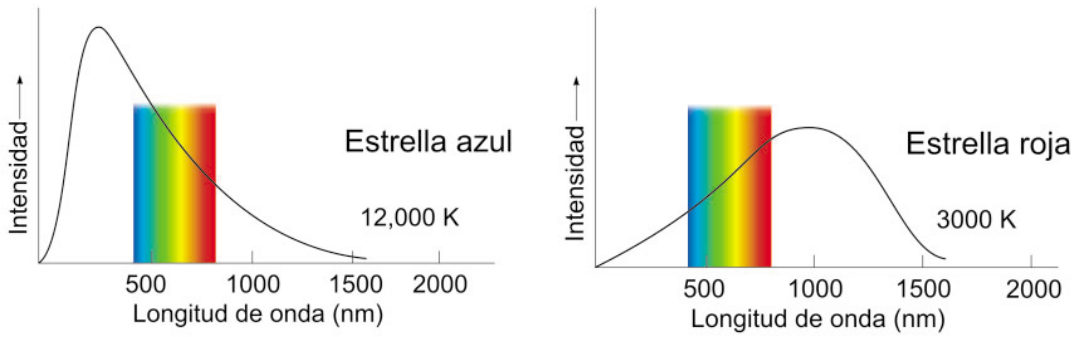

Figura 2: Temperatura y color de las estrellas
Este diagrama esquemático muestra la relación entre el color de una estrella y su temperatura superficial. La intensidad se representa frente a la longitud de onda para dos estrella hipotéticas. Se indica la parte visible del espectro. El color de las estrellas se determina por el pico de la curva de intensidad, en la parte visible del espectro.

Herramientas astronómicas

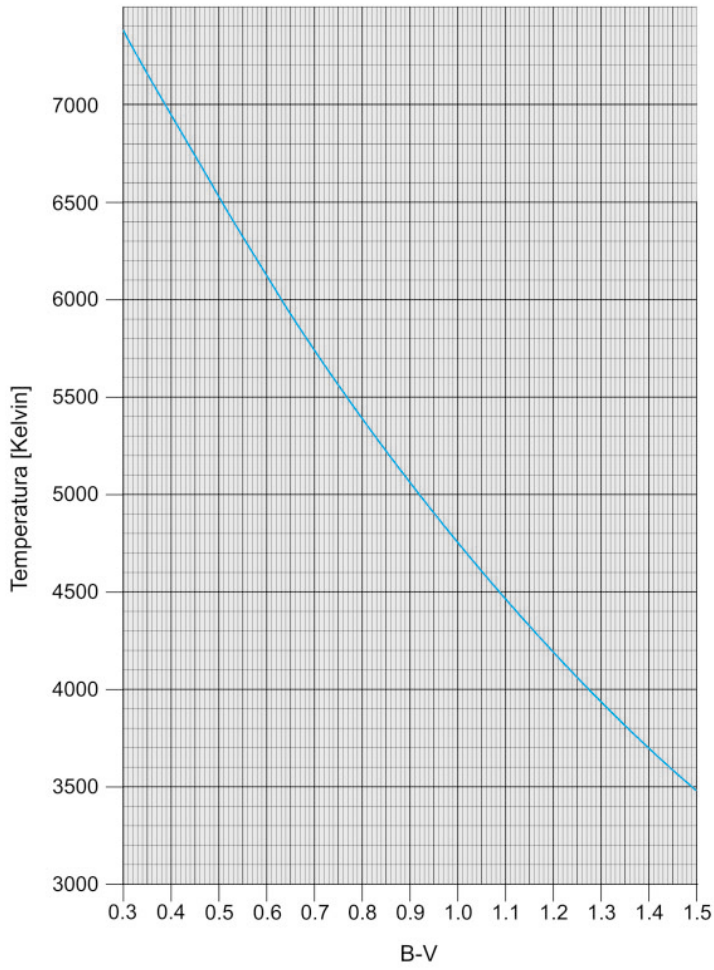

Figura 3: Temperatura superficial frente a índice de color B–V
Esta gráfica muestra la relación entre la temperatura superficial de una estrella T, y su índice de color B–V. Conociendo bien la temperatura superficial, bien el índice de color B–V, se puede encontrar el valor de la otra magnitud a partir de esta gráfica.

Consecuentemente, dos escalas separadas fueron ideadas: *magnitud visual*, o m_{vis}, que describe como se ve una estrella a simple vista y *magnitud fotográfica*, o m_{phot} que se refiere a las medidas hechas con películas fotográficas de blanco y negro sensibles al azul. Estas magnitudes se abrevian ahora como m_v y m_p.
Sin embargo diferentes tipos de emulsiones fotográficas difieren en su sensibilidad para diferentes colores. ¡Y personas diferentes también perciben la luz de manera diferente! Los sistemas de magnitudes diseñados para diferentes rangos de longitud de onda tuvieron que ser calibrados de manera más precisa.

Hoy en día, se consiguen magnitudes precisas por medio de medidas hechas con fotómetros fotoeléctricos estándar a través de filtros de color estándar. Se han ideado varios sistemas fotométricos; el más popular se llama UBV, en referencia a los tres filtros usados más comúnmente. El filtro U permite que pase la mayor parte de la luz del ultravioleta cercano, el filtro B principalmente la luz azul y el filtro V corresponde con bastante precisión a la vieja magnitud visual; su amplio pico se encuentra en la banda amarillo-verde, donde el ojo es más sensible. Las magnitudes correspondientes en este sistema se llaman m_U, m_B and m_V.

Del índice de color B–V a la temperatura

El término *índice de color B–V* (llamado simplemente B–V p or los astrónomos) se define como la diferencia entre las dos magnitudes, m_B–m_V (tal como se mide en el sistema UBV). Una estrella blanca pura tiene una índice de color B–V de aproximadamente 0.2, nuestro Sol amarillo de 0.63, la estrella Betelgeuse rojo-anaranjada de 1.85 y la estrella más azul conocida tiene un índice de color B–V de –0.4. Para comprender lo que el índice de color representa hay que tener en cuenta que cuanto más azul es una estrella, más negativa su magnitud B y por tanto menor será la diferencia m_B–m_V.
Hay una relación clara entre la temperatura superficial T y su índice de color B–V (ver Reed, C., 1998, Journal of the Royal Society of Canada, 92, 36-37) de manera que podemos encontrar la temperatura superficial de una estrella usando una gráfica de T frente a m_B–m_V (ver Fig. 3).

$$\log_{10}(T) = (14.551 - (m_B - m_V)\ )/\ 3.684$$

La ecuación de distancia

La ecuación de distancia viene dada por:

$$m\text{-}M = 5\ \log_{10}\ (D/10\ pc) = 5\ \log_{10}(D) - 5$$

Esta ecuación establece la conexión entre la magnitud aparente, m, la magnitud absoluta, M y la distancia, D, medida en parsec. El valor m–M se conoce como *módulo de distancia y* puede usarse para determinar la distancia de un objeto.

Un poco de álgebra transformará esta ecuación en una forma equivalente que a veces es más conveniente (comprueba tú mismo la validez de la expresión):

$$D = 10^{(m-M+5)/5}$$

Cuando se determina la distancia a los objetos en el Universo, medimos primero la magnitud aparente m. A continuación, si conocemos también el brillo intrínseco de un objeto (su magnitud absoluta M), podemos calcular su distancia D. La mayor parte del esfuerzo al calcular las distancias astronómicas se debe a la dificultad en determinar la magnitud absoluta de ciertos tipos de objetos astronómicos. Las magnitudes absolutas han sido medidas por ejemplo por el satélite de HIPPARCOS de la ESA. HIPPARCOS es un satélite que, entre otras muchas cosas, mide de forma precisa distancias y magnitudes aparentes de un gran número de estrellas cercanas.

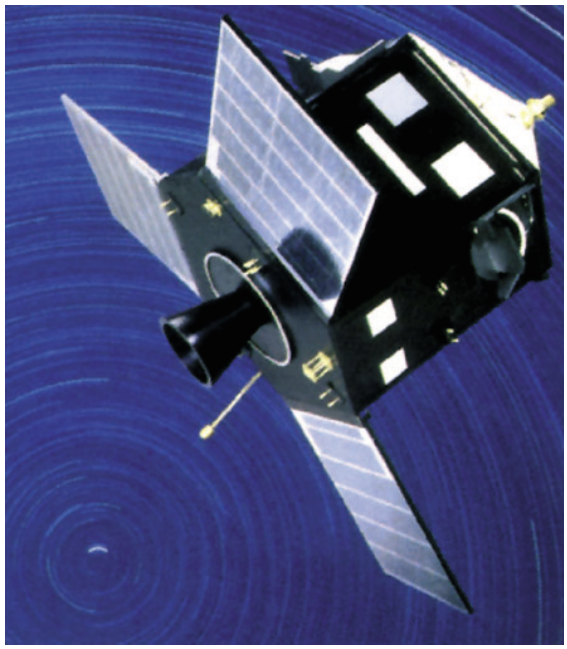

Figura 4: El satélite HIPPARCOS de la ESA
El satélite HIPPARCOS fue lanzado la noche del 8 de agosto de 1989 por el lanzador europeo Ariane 4. El objetivo principal de la misión HIPPARCOS de la ESA era la producción de un catálogo de estrellas de precisión sin precedentes. Se determinaron con alta precisión las posiciones y las distancias de un conjunto de aproximadamente 120,000 estrellas preseleccionadas con magnitudes por debajo de m_B = 13. La misión HIPPARCOS finalizó en 1993 y el catálogo final de estrellas fue publicado en 1997.

Tarea AT4

La estrella α-Canis Majoris (Sirio) es la estrella más brillante del cielo. Está a una distancia de 2.64 parsecs y su magnitud aparente es –1.44

¿? Calcula la magnitud absoluta de Sirio. Si la comparas con las magnitudes absolutas de las otras tres estrellas, ¿qué tienes que decir del brillo intrínseco o físico de Sirio?

Tarea AT5

¿? Si las estrellas Vega, Sirio, Betelgeuse y Deneb estuvieran a 10 parsecs de la Tierra (en la misma región del cielo), ¿qué veríamos?

Tarea AT6

La magnitud absoluta M se define como la magnitud aparente que tendría una estrella si estuviera a 10 parsecs del Sol.

¿? ¿Pero, no sería más correcto medir la distancia desde la Tierra? ¿Por qué no hay diferencia entre medir la distancia desde el Sol o desde la Tierra?

Luminosidad e intensidad

Hasta ahora hemos hablado de las magnitudes estelares, pero no hemos mencionado en ningún momento la energía luminosa que realmente emite la estrella. La energía total emitida por segundo en forma de luz por la estrella por segundo se denomina luminosidad L y se mide en watios (W). Es equivalente a la potencia emitida.

La luminosidad y las magnitudes están relacionadas. Una estrella remota con una gran luminosidad puede tener la misma magnitud aparente que una estrella cercana de baja luminosidad. Sabiendo la magnitud aparente y la distancia a la estrella, podemos determinar su luminosidad.

La estrella emite luz en todas direcciones de forma que su emisión se extiende sobre una esfera. Para encontrar la intensidad I de la luz de una estrella sobre la Tierra (la intensidad es la potencia emitida por unidad de área), dividimos su luminosidad por el área de una esfera con la estrella en el centro y radio igual a la distancia D de la estrella a la Tierra. Ver Fig. 5.

$I = L/(4\pi D^2)$

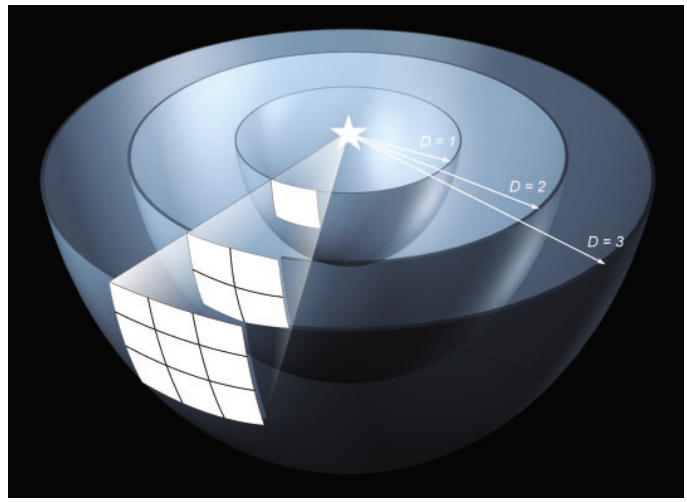

Figura 5: Intensidad de la luz
Este dibujo muestra cómo la misma cantidad de radiación de una fuente luminosa debe iluminar un área que aumenta continuamente a medida que se incrementa la distancia a la fuente luminosa. El área aumenta como el cuadrado de la distancia a la fuente, así que la intensidad decrece con el cuadrado de la distancia.

$\omega = (\overline{Herramientas\ astronómicas})$

La luminosidad de una estrella puede también expresarse como un múltiplo de la luminosidad del Sol, $L_{solar} = 3.85 \times 10^{26}$ W. Debido a que el Sol es "nuestra" estrella y la estrella mejor conocida, se toma casi siempre como estrella de referencia.
Usando algo de álgebra, encontramos la fórmula para calcular la luminosidad L de una estrella respecto a la luminosidad del Sol:

$$L/L_{solar} = (D/D_{solar})^2 \cdot I/I_{solar}$$

La razón I/I_{solar} se puede obtener usando la fórmula dada en la sección "Magnitudes aparentes" de las Herramientas Astronómicas" ($m_{solar} = -26.5$).

Ángulos pequeños y grandes distancias

Echa un vistazo a la Fig. 6:
Si b es pequeño comparado con c, podemos suponer que los dos lados más largos del triángulo, c, tienen la misma longitud que la línea central.
Con las ecuaciones usuales para un triángulo rectángulo, encontramos:

$$\text{sen}(\beta/2) = (b/2)/c$$

Podemos usar la aproximación para ángulos pequeños sin x = x, si los ángulos bajo estudio son muy pequeños (pero sólo cuando el ángulo se mide en radianes). Esta aproximación puede parecer menos justificad que la anterior pero puede probarse matemáticamente que es una muy buena aproximación para ángulos pequeños.

Tarea MT1

¿? Comprueba tú mismo la validez de esta aproximación calculando sen(1º), sen(1'), sen(1''). Fíjate en que primero tienes que convertir los ángulos de grados a radianes.

Ahora tienes una relación simple entre b, c y β sin funciones trigonométricas.

$$\beta/2 = (b/2)/c$$

$$c = b/\beta$$

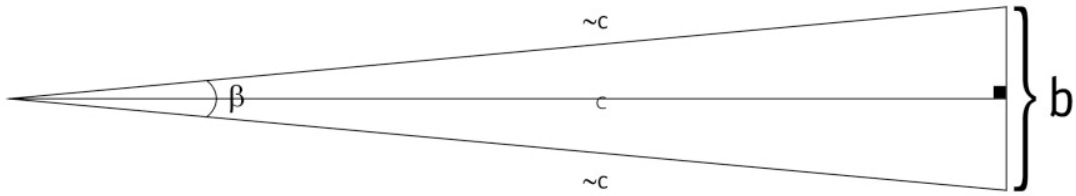

Figura 6: Tratamiento de ángulos pequeños
Si b es pequeño comparado con c, entonces β es un ángulo pequeño. Podemos por tanto obtener una relación entre b, c y β sin funciones trigonométricas.

Unidades y otros datos básicos

1 minuto de arco = 1' = 1/60 de grado = 2.9089×10^{-4} radianes
1 segundo de arco = 1'' =1/3600 de grado = 4.8481×10^{-6} radianes
1 milisegundo de arco (mas) = 1/1000 segundos de arco
Velocidad de la luz (c) = 2.997×10^8 m/s
1 parsec (pc) = 3.086×10^{13} km = 3.26 años luz
1 kiloparsec (kpc) = 1000 parsecs
1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 parsecs
1 nanometro (nm) = 10^{-9} m